

日本特許庁  
JAPAN PATENT OFFICE

01.10.2004

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出願年月日  
Date of Application: 2004年 3月 15日

出願番号  
Application Number: 特願 2004-072642  
[ST. 10/C]: [JP 2004-072642]

出願人  
Applicant(s): 日本航空電子工業株式会社

REC'D 26 NOV 2004
WIPO PCT

PRIORITY DOCUMENT  
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN  
COMPLIANCE WITH  
RULE 17.1(a) OR (b)

2004年11月12日

特許庁長官  
Commissioner,  
Japan Patent Office

小川

洋

**【書類名】** 特許願  
**【整理番号】** JAE04N7330  
**【提出日】** 平成16年 3月15日  
**【あて先】** 特許庁長官殿  
**【国際特許分類】** C23F  
**【発明者】**  
**【住所又は居所】** 東京都渋谷区道玄坂1丁目21番2号 日本航空電子工業株式会社内  
**【氏名】** 佐藤 明伸  
**【発明者】**  
**【住所又は居所】** 東京都渋谷区道玄坂1丁目21番2号 日本航空電子工業株式会社内  
**【氏名】** 鈴木 晃子  
**【発明者】**  
**【住所又は居所】** 東京都渋谷区道玄坂1丁目21番2号 日本航空電子工業株式会社内  
**【氏名】** ブーレル エマニュエル  
**【発明者】**  
**【住所又は居所】** 京都府京都市左京区岩倉長谷91-3  
**【氏名】** 松尾 二郎  
**【発明者】**  
**【住所又は居所】** 大阪府大阪市西区鞠本町1-8-4 財団法人 大阪科学技術センター内  
**【氏名】** 瀬木 利夫  
**【発明者】**  
**【住所又は居所】** 大阪府大阪市西区鞠本町1-8-4 財団法人 大阪科学技術センター内  
**【氏名】** 青木 学聰  
**【特許出願人】**  
**【識別番号】** 000231073  
**【氏名又は名称】** 日本航空電子工業株式会社  
**【代理人】**  
**【識別番号】** 100066153  
**【弁理士】**  
**【氏名又は名称】** 草野 卓  
**【選任した代理人】**  
**【識別番号】** 100100642  
**【弁理士】**  
**【氏名又は名称】** 稲垣 稔  
**【先の出願に基づく優先権主張】**  
**【出願番号】** 特願2003-339566  
**【出願日】** 平成15年 9月30日  
**【手数料の表示】**  
**【予納台帳番号】** 002897  
**【納付金額】** 21,000円  
**【提出物件の目録】**  
**【物件名】** 特許請求の範囲 1  
**【物件名】** 明細書 1  
**【物件名】** 図面 1  
**【物件名】** 要約書 1

特願 2004-072642

ページ： 2/E

【包括委任状番号】 9708750

出証特 2004-3102464

【書類名】特許請求の範囲

【請求項 1】

ガスクラスターイオンビームを用い固体表面を平坦に加工する方法において、前記固体表面と前記ガスクラスターイオンビームがなす照射角度を30度未満にすることを特徴とする固体表面の平坦化方法。

【請求項 2】

前記請求項1の平坦化方法による加工を行う前に、前記固体表面と前記ガスクラスターイオンビームがなす照射角度を30度以上として前記固体表面を平坦に加工することを特徴とする請求項1記載の固体表面の平坦化方法。

【請求項 3】

ガスクラスターイオンビームを用い固体表面を平坦に加工する方法において、前記固体表面と前記ガスクラスターイオンビームがなす照射角度を、30度以上の角度と30度未満の角度との間を連続的に変化させることを繰り返して前記固体表面を加工することを特徴とする固体表面の平坦化方法。

【請求項 4】

前記照射角度を30度未満とする前記固体表面は、固体表面に形成された凹部または凸部の側壁表面であることを特徴とする請求項1～3のいずれかに記載の固体表面の平坦化方法。

【請求項 5】

ガスクラスターイオンビームを用い固体表面を平坦に加工する装置であって、前記固体表面と前記ガスクラスターイオンビームがなす照射角度が30度未満とされている又は前記角度を30度未満に設定できる照射角度設定手段を備えることを特徴とする固体表面の加工装置。

【書類名】明細書

【発明の名称】固体表面の平坦化方法およびその装置

【技術分野】

【0001】

この発明は、例えば半導体、その他電子デバイス等の基板表面の平坦化や各種デバイス表面の平坦化に適用でき、ガスクラスターイオンビーム照射により固体表面を平坦化する方法およびその装置に関するものである。

【背景技術】

【0002】

これまでに、電子デバイス等の表面平坦化などを目的に各種の気相反応方法が開発され、実用化されてきている。たとえば、特許文献1に示す基板表面を平坦化する方法はAr(アルゴン)ガスなどの単原子または分子イオンを低角度で基板表面に照射し、スパッタリングすることによって平坦化している。

また、近年、ガスクラスターイオンビームを用いた固体表面の平坦化方法が、表面損傷が少なく、かつ表面粗さを非常に小さくできることで注目を集めている。たとえば、特許文献2には、ガスクラスターイオンビームを固体表面に照射して、表面粗さを低減する方法が開示されている。この方法は、被加工物へ照射されたガスクラスターイオンが被加工物との衝突で壊れ、その際クラスター構成原子または分子および被加工物構成原子または分子と多体衝突が生じ、被加工物表面に対して水平方向への運動が顕著になり、その結果、被加工物表面に対して横方向の切削が行われる。これは「ラテラルスパッタリング」と呼ばれている現象である。さらに被加工物表面を横方向に粒子が運動することにより、表面の凸部が主に削られ原子サイズでの平坦な超精密研磨が得られることになる。また、ガスクラスターイオンビームは、イオンの持つエネルギーが通常のイオンエッティングのそれと異なり、より低いため被加工表面に損傷を与えることなく、所要の超精密研磨を可能とする。これは、ガスクラスターイオンビームによる固体表面平坦化は、前記特許文献1に示すイオンエッティングよりも加工表面損傷が少ないという利点を示すことになる。

【0003】

ガスクラスターイオンビームによる平坦化では被加工物表面へのクラスターイオンビーム照射方向は、通常は、その被加工表面に対して略垂直方向から照射するのが好ましい、ということが一般には認識されている。これは、先に記述した「ラテラルスパッタリングによる表面平滑化」の効果を最大限利用するためである。ただし、前記特許文献2には、曲面等の場合にはその表面状況に応じて斜め方向から照射してもよい、という記述はあるが、斜め方向から照射した場合の効果については言及していない。したがって、この特許文献1では固体表面の平坦化にとって一番効率がよいのは、その表面に対して略垂直方向から照射するものである、ということになる。

【0004】

また、ガスクラスターイオンビームを用いた固体表面の平坦化に関して、特許文献3にも開示例がある。この特許文献3でも、ガスクラスターイオンビームと固体表面とのなす角度と、表面平坦化との関係についての記述がなく、開示されている記述からは「ラテラルスパッタリング」効果を用いていることから考えて、先に示した特許文献2と同様に、垂直照射のデータが示されているものと考えられる。

また、非特許文献1にもガスクラスターイオンビーム照射による固体表面の平坦化に関する報告がある。Toyodaらは、Cu、SiC、GaNなどの材料表面に、Arクラスターイオンを照射し、表面粗さが低減することを示している。この場合でも、表面に対して略垂直方向からガスクラスターイオンビームを照射しているものである。

【0005】

また、ガスクラスターイオンビームを固体表面に対して、いろいろな照射角度で照射した場合の固体表面の粗さ変化について、非特許文献2に記述されている。固体表面に対して垂直に照射する場合を90度、この表面と平行に照射する場合を0度としたときに、表面をエッティングする速度であるスパッタ率は垂直照射のときが一番大きく、照射角度が小

さくなるに従ってエッチング率も小さくなることが示されている。表面粗さと照射角度の関係については、照射角度を90度、75度、60度、45度、30度と変化させて実験を行っており、照射角度が小さくなるに従って表面粗さは大きくなることが示されている。照射角度を30度以下にする検討が実験的に行われていないが、これは照射角度を小さくするに従って表面粗さが大きくなるため、そのようなことを行っても無駄と判断されたからと思われる。

#### 【0006】

また、集積回路などの電子デバイスや、光通信に用いる光デバイスの多くは、固体表面や薄膜材料表面に微細加工による凹凸パターンが形成されており、その凹凸パターンにおける凹部または凸部の側壁表面の平坦化にガスクラスターイオンビームを用いた報告はない。これは、凹部または凸部側壁表面にはガスクラスターイオンビームをほぼ垂直に照射し難いことや、ラテラルスパッタリングというメカニズムでは側壁表面の平坦化ができないと考えられていたためである。

以上述べたように、ガスクラスターイオンビームを用いて固体表面を平坦化する場合、ガスクラスターイオンビームの固体表面に対する照射角度を90度にすると表面粗さが最も小さく、照射角度を小さくするに従って表面粗さが大きくなるため、照射角度を略垂直にすること以外は考えられなかったといつても過言でない。

【特許文献1】特開平7-58089号公報

【特許文献2】特開平8-120470号公報

【特許文献3】特開平8-293483号公報

【非特許文献1】Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 41 (2002) pp. 4287-4290

【非特許文献2】Materials Science and Engineering R34 (2001) pp. 231-295

#### 【発明の開示】

#### 【発明が解決しようとする課題】

#### 【0007】

特許文献1に開示されている、Ar（アルゴン）ガスなどのスパッタリングすることによる平坦化方法は、基板表面に存在した凸部が優先的に削られ、ある程度までは平坦化される一方で、基板表面の損傷を抑えるためには照射エネルギーを100eV程度以下にする必要があるが、この場合にはイオン電流が極端に少なくなり、実用的なスパッタリング速度が得られなくなるという問題点があった。

特許文献2及び3、非特許文献1及び2などに示すガスクラスターイオンビームを固体表面に照射して、「略垂直入射ラテラルスパッタリング」を用いて表面平坦化を行う方法は、表面粗さがある程度までは小さくなるが、さらに小さくする要望には対応できない。また、このガスクラスターイオンビームによる略垂直照射ラテラルスパッタリングでは、表面平坦化をする場合に、固体表面全体に渡ってある程度のエッチングが生じるが、そのエッチング量が無視できない場合がある。たとえば、表面粗さ（Ra）が数nmで、数10nm程度の膜厚を有する薄膜材料表面を平坦化しようとした場合には、表面粗さを1nm程度に低減するときに、数10nm程度のエッチング量が必要である場合がある。この場合には、その薄膜材料の表面平坦化にガスクラスターイオンビームを採用できないという問題点があった。

#### 【0008】

また、凹凸パターンが形成された凹部または凸部の側壁表面の平坦化にはガスクラスターイオンビームを採用できず、この側壁表面を十分平坦化することは困難であるという問題点があった。

この発明はこのような問題を解決するもので、半導体などの各種デバイスや材料に対して、表面損傷が小さく、かつ、表面の粗さを、従来の方法による場合より小さくすることができる表面平坦化方法およびその装置を提供することを目的とする。

#### 【課題を解決するための手段】

#### 【0009】

この発明によればガスクラスターイオンビームを固体表面に照射して、その固体表面を

平坦化する方法において、固体表面とガスクラスターイオンビームとのなす照射角度を30度未満とする。

【発明の効果】

【0010】

この発明によれば、従来の方法よりも表面粗さを小さくすることができ、かつ表面損傷も小さいものとすることができます。

この発明による平坦化方法のメカニズムは、次のように考えられる。ある臨界角を超えた小さな照射角度でガスクラスターイオンビームが固体表面に照射すると、ガスクラスターを形成している原子または分子は、その固体表面にほとんど進入することなしに固体表面と平行方向に反跳する。この反跳原子または反跳分子が固体表面の突起をスパッタリングすると考えられる。

【0011】

このとき、ガスクラスターではない通常のイオンビームを用いると、照射角度が非常に小さい領域で一見類似したような効果が認められるが、その本質は全く異なっている。通常のイオンビームを用いた平坦化方法では、ガスクラスター特有の多体衝突効果がないので、「ガスクラスターを形成している原子または分子は、その固体表面にほとんど進入することなしに固体表面と平行方向に反跳する」というガスクラスターイオンビーム特有の現象が起こらない。したがって、この発明の平坦化方法と通常のイオンビームを用いた平坦化方法は全く異なった表面平坦化プロセスとなる。このために、通常のイオンビームを用いた表面平坦化方法では、表面損傷が大きくなったり、表面粗さ低減効果が少なかつたり、加工速度が著しく遅くなったりするという問題が発生する。

【0012】

なおこの発明方法の上述したメカニズムによる効果を、「斜め入射表面スパッタリング効果」(Oblique Incident Surface Sputtering Effect)と呼ぶ。

【発明を実施するための最良の形態】

【0013】

以下この発明の実施形態を実施例により発明する。まずこの発明の固体表面の平坦化方法を実現するガスクラスターイオンビーム平坦化装置の基本構成を図1を参照して説明する。原料ガスをノズル10から真空のクラスター生成室11内に噴出させて、ガス分子を凝集させクラスターを生成する。そのクラスターをスキマー12を通してクラスター ビームとしてイオン化室13へ導く。イオン化室13ではイオンナイザ14から電子線、例えば熱電子を照射して中性クラスターをイオン化する。このイオン化されたクラスター ビームは、加速電極15によって加速され、また磁界集束器16によりビームが集束されてスパッタ室17に入射される。スパッタ室17内に設けられた試料支持体18に試料19が取付けられ、入射されたクラスターイオンビームがアーチャー21により所定のビーム径とされて試料19の表面に照射される。電気的絶縁体の試料19の表面を平坦化する場合には、クラスターイオンを電子によりあらかじめ中性化する場合もある。

【0014】

【実施例1】

原料ガスとしてSF<sub>6</sub>ガスをHeガスと混合したものを用い、SF<sub>6</sub>分子が約500個凝集したクラスターをサイズ分布のピークとするSF<sub>6</sub>クラスターイオンビームを生成し、SF<sub>6</sub>クラスターイオンを30kVに加速して、試料19の表面に各種の照射角度θで照射し、照射ドーズ量を、4×10<sup>15</sup>ions/cm<sup>2</sup>とした。照射前後の試料膜の表面粗さを原子間力顕微鏡(AFM)を用いて測定した。それらの測定結果は図2に示す。

試料として、シリコン基板上にスパッタ法に成膜したクロム(Cr)膜、白金(Pt)膜、ニッケル(Ni)膜、二酸化シリコン(SiO<sub>2</sub>)膜、シリコン(Si)膜のそれぞれを用いた。それぞれのクラスターイオンビームCr膜、Si膜については25度照射条件での膜のエッチング量を原子間力顕微鏡を用いて測定した。その結果はそれぞれ10nm、340nmであった。なお、Cr膜の初期(照射前)の表面粗さは3.1nmである。またSi膜については平坦化処理後の表面における損傷程度を測定するために照射角度

25度におけるSi膜中の表面層に進入したSのプロファイルを2次イオン質量分析法(SIMS)を用いて評価した。その結果、表面から10nm程度までしかSが進入していなかった。

[実施例2]

照射ドーズ量を $5 \times 10^{14}$  ions/cm<sup>2</sup>とした以外は実施例1と同一条件として、照射角度25度でCr膜にSF<sub>6</sub>クラスターイオンを照射した。照射後のCr膜の表面粗さを原子間力顕微鏡を用いて測定した。表面粗さ(Ra)は0.92nmであった。

[実施例3]

実施例1と同様な装置を用い、原料ガスとしてArガスを用い、Ar分子が約2000個凝集したクラスターをサイズ分布のピークとするArクラスターイオンビームを生成し、Arクラスターイオンを30kVに加速して、各種照射角度θにてCr膜表面に照射した。照射ドーズ量は、 $4 \times 10^{15}$  ions/cm<sup>2</sup>とした。照射前後のCr膜の表面粗さを原子間力顕微鏡を用いて測定した。測定結果は図2に示す。なおCr膜はシリコン基板上にスパッタ法により形成したものである。

[実施例4]

実施例1と同様の条件として、Cr膜についてSF<sub>6</sub>クラスターイオンの照射を行ったが、その際に、照射角度θを90度から0度まで連続的に変化させ、さらに0度から90度へと連続的に変化させることを1サイクルとして、1サイクルを1秒で変化させた。また照射ドーズ量は、 $5 \times 10^{14}$  ions/cm<sup>2</sup>とした。照射後のCr膜の表面粗さを原子間力顕微鏡を用いて測定した。表面粗さ(Ra)は0.43nmであった。

[実施例5]

実施例1と同様な条件でSF<sub>6</sub>ガスクラスターイオンビームをCr膜に照射したが、第一段階として照射角度θを90度として照射し、このときの照射ドーズ量は、 $3 \times 10^{14}$  ions/cm<sup>2</sup>とし、さらに第二段階として照射角度θを25度でCr膜表面に照射し、このときの照射ドーズ量は、 $2 \times 10^{14}$  ions/cm<sup>2</sup>とした。照射ドーズ量は全体としては実施例4と同じ $5 \times 10^{14}$  ions/cm<sup>2</sup>となるようにした。照射後のCr膜の表面粗さを原子間力顕微鏡を用いて測定した。表面粗さ(Ra)は0.41nmであった。

[実施例6]

熱酸化膜を形成したシリコン基板上にレジストを塗布し、電子線ビーム露光装置を用いラインアンドスペースパターン(間隔をおいて複数の平行線)を描画し、現像してマスクパターンを形成した。ライン(線)幅は1μm、スペース幅(間隔)は4μmとした。反応性イオンエッチャリング装置を用いて酸化シリコン膜をエッチャリングし、ハードマスクを形成した。その後、高周波誘導結合プラズマ法反応性イオンエッチャリング装置(ICP-RIE)を用いてシリコン基板を深さ10μm程度エッチャリングした。図4に示すようにシリコン基板31上に複数の板状体32が間隔をおいて平行に形成されたものとなる。つまり固体表面に凹凸パターンが形成される。この固体表面に形成された凹部または凸部の側壁表面、図4では板状体32の板面を、実施例1と同様な条件でSF<sub>6</sub>ガスクラスターイオンビームを照射した基板表面に対する照射角度θは85度であり、同時にラインアンドスペースパターンの側壁表面に対しては照射角度θ<sub>p</sub>が5度となるように照射した。このときの照射ドーズ量は、 $6 \times 10^{13}$  ions/cm<sup>2</sup>とした。照射後のラインアンドスペースパターン側壁表面の粗さを原子間力顕微鏡により測定した。表面粗さ(Ra)は0.34nmであった。

[実施例7]

熱酸化膜を形成したシリコン基板上にレジストを塗布し、電子線ビーム露光装置を用い円形パターンを描画し、現像してマスクパターンを形成した。円形パターンの直径は5μm、円形パターンのピッチは10μmとした。反応性イオンエッチャリング装置を用いて酸化シリコン膜をエッチャリングし、ハードマスクを形成した。その後、高周波誘導結合プラズマ法反応性イオンエッチャリング装置(ICP-RIE)を用いてシリコン基板を深さ10μm程度エッチャリングした。図5に示すようにシリコン基板31上に複数円柱33が間隔をおい

て形成されたもの、つまり固体表面に凹凸パターンが形成される。この凹凸固体表面における凹部または凸部の側壁表面、図5では円柱33の周面を実施例1と同様な条件でSF<sub>6</sub>ガスクラスターイオンビームを照射したが、基板表面に対する照射角度θを80度とした。このとき、円柱33の側壁表面つまり周面に対しては照射角度は一定とはならない。この円柱33の側壁表面（周面）における円柱33の軸心とガスクラスターイオンビームを含む面における周面に対しての最大照射角度θ<sub>p</sub>が10度となるように照射した。さらに、図5に示すように円柱33を形成した基板31を円柱33の軸心を中心として回転させて、円柱33の側壁表面（周面）の全面にガスクラスターイオンビームが照射されるようにした。このときの照射ドーズ量は、 $2 \times 10^{14}$  ions/cm<sup>2</sup>とした。照射後の円柱33の側壁表面の粗さを原子間力顕微鏡により測定した。表面粗さ（Ra）は0.39nmであった。

#### 【0015】

##### [比較例1]

[実施例1]と同一条件とし、Cr膜、Pt膜、SiO<sub>2</sub>膜およびSi膜について、照射角度θを基板面に対して垂直にしてそれぞれに照射した。照射ドーズ量は、 $4 \times 10^{15}$  ions/cm<sup>2</sup>とした。照射前後の各種材料表面粗さを原子間力顕微鏡を用いて測定した。測定結果を図2に示す。また、このときのSi膜のエッチング量を原子間力顕微鏡を用いて測定した。その結果は1050nmであった。

##### [比較例2]

市販のイオンビームエッチング装置を用い、SF<sub>6</sub>イオンビームを生成し、SF<sub>6</sub>イオンを30kVに加速して、実施例1で用いたと同様の試料、Cr膜、Pt膜、SiO<sub>2</sub>膜およびSi膜にスパッタ法により照射した。照射ドーズ量は、 $4 \times 10^{15}$  ions/cm<sup>2</sup>とした。照射前後の各種材料表面粗さを原子間力顕微鏡を用いて測定した。結果は、どの条件で照射しても各種材料表面の粗さ（Ra）は2nm以上となった。また、平坦化処理後の表面における損傷程度を測定するために、Si膜中の表面層に進入したSのプロファイルを2次イオン質量分析法（SIMS）を用いて評価した。その結果、表面から40～50nmまでSが進入していた。

##### [比較例3]

実施例6と同一条件として図4に示した凹凸パターンをもつ固体表面を形成した。この固体表面に対しガスクラスターイオンビーム照射することなく、凹部または凸部の側壁表面、図4では板状体32の板面の表面粗さを原子間力顕微鏡により測定した。表面粗さ（Ra）は3.28nmであった。

##### [比較例4]

実施例6とガスクラスターイオンビームの基板表面31aに対する照射角度を90度とした点を除いて同一条件とした。この凹部または凸部の側壁表面の粗さを原子間力顕微鏡により測定した。表面粗さ（Ra）は3.03nmであった。

##### [比較例5]

熱酸化膜を形成したシリコン基板上にレジストを塗布し、電子線ビーム露光装置を用いラインアンドスペースパターンを描画し、現像してマスクパターンを形成した。反応性イオンエッチング装置を用いて酸化シリコン膜をエッチングし、ハードマスクを形成した。その後、マスク付きシリコン基板を実施例1と同様な条件でSF<sub>6</sub>ガスクラスターイオンビームを照射してエッチングを行ったが、基板表面に対する照射角度θが90度になるようにした。このときの照射ドーズ量は、 $2 \times 10^{15}$  ions/cm<sup>2</sup>とした。この照射後にはシリコン基板に間隔をおいて平行した線状溝、つまりラインアンドスペースパターンの凹凸表面が形成された。その溝の側壁つまり凹凸をもつ固体表面における凹部または凸部の側壁表面の粗さを原子間力顕微鏡により測定した。表面粗さ（Ra）は2.17nmであった。

#### 【0016】

##### 考察

実施例1、実施例3、および比較例1～比較例2を参照すると次のことがわかる。ガス

クラスターイオンビームの照射角度 $\theta$ を90度（垂直照射）から小さくしていくと、表面粗さは照射角度 $\theta$ が30度までは比較的単調に増加する。照射角度 $\theta$ が30より小さくなると、表面粗さは急激に減少し、しかも90度照射のときの表面粗さよりも小さくなることがわかる。さらに照射角度 $\theta$ を小さくしていっても表面粗さは小さい状態が継続し、1度未満になると再び急激に表面粗さが増加する。

#### 【0017】

0度照射の状態は、固体表面はほとんどエッティングされないものであり、この場合の表面粗さの値は、各種膜の初期状態の表面粗さをほぼ反映しているものと考えられる。ここで注目すべきことは、30度未満の照射角で照射した場合、略垂直照射の場合と比べて可成り小さな表面粗さの値が実現されることである。この結果は、従来の略垂直照射によるガスクラスターイオンビームを用いた固体表面の平坦化方法よりも、この発明による固体表面の平坦化方法の方が表面粗さを可成り小さくできることを示しているものである。また、ガスクラスターの種類として、化学反応性のあるSF<sub>6</sub>ガスと化学反応性のないArガスを用いた場合でも同様な結果が得られていることから、この発明による固体表面の平坦化方法はガスクラスターの種類には依存しないことがわかる。更に、平坦化する材料の種類が、SF<sub>6</sub>クラスターに対して化学反応性があるSiや化学反応性のないPtなどでも同様な結果が得られていることから、この発明による固体表面の平坦化方法は平坦化する材料の種類には依存しないことがわかる。

#### 【0018】

比較例2のガスクラスターではない通常のイオンビームによる結果では、固体表面の顕著な平坦化は見られず、ガスクラスターイオンビームを用いるこの発明の優位性が確認できる。

また、平坦化処理後の表面における損傷程度を比較してみると、従来のイオンビームによる方法では表面から40～50nmまでSiが進入し、損傷しているのに対して、この発明では10nm以下しか損傷をしておらず、この発明を用いることによって固体表面の平坦化が非常に低損傷で実現できることがわかる。

#### 【0019】

更に、平坦化処理時の固体表面のエッティング量について見てみると、従来方法による垂直照射ではSi膜で1050nmと非常に大きなエッティング量であるが、この発明による25度入射条件でのSi膜のエッティング量が3分の1以下の340nmとなり、著しく小さなエッティング量で表面平坦化が実現できることがわかる。Cr膜では初期粗さが3.1nmで照射後の粗さを0.5nm程度にしてもエッティング量が10nmに過ぎない。このエッティング量が少ないという効果によって、この発明では薄膜材料の平坦化等に好適であることがわかる。

#### 【0020】

次に、実施例4および5を参考すると以下のことがわかる。ガスクラスターイオンビームの照射角度 $\theta$ を単一な角度だけで照射するのではなく、固体表面とガスクラスターイオンビームとのなす角を変化させながらガスクラスターイオンビームを照射することによって、短時間で（照射ドーズ量が少ない状態で）表面粗さを小さくすることができる。また、固体表面とガスクラスターイオンビームとのなす角度として第一段階は90度の照射角度 $\theta$ を用い、第二段階として25度の照射角度 $\theta$ を用いることによっても、短時間で（照射ドーズ量が少ない状態で）表面粗さを小さくすることができる。図2に示すグラフから、大ざっぱに云えば照射角度 $\theta$ を第一段階で30度以上、第二段階で30度未満とすればよく、好ましくは第一段階で50～90度、第二段階で1～30度未満とすればよいことが理解される。

#### 【0021】

この照射角度 $\theta$ を変化させたり、二段階の角度を用いたりする方法は、特に次のような試料に有効であると考えられる。試料の表面が比較的平坦な場合には、この発明の照射角度 $\theta$ を30度未満にすることが一番有効であると考えられるが、試料表面の粗さが比較的大きい場合には、ミクロに見ると試料表面にいろいろな角度を持った領域が存在すること

になる。このような表面にいろいろな角度を持つた領域がある場合には、たとえば略垂直照射で平坦化するほうが効率的な場合がある。これは図2を見ると明らかのように、照射角度 $\theta$ を変化させても平坦化が起こるマージンは略垂直照射付近が一番大きくなっている。この発明により新たに明らかとなった25度照射付近で考えると、照射角度 $\theta$ が10度ずれると35度照射と等価な状態になり、平坦化し難くなる。これに対し、90度照射では照射角度 $\theta$ が10度ずれても、80度照射と等価な状態になるので、平坦化し難くなることはあまりない。したがって、試料表面の粗さが比較的大きい場合には、照射角度 $\theta$ を変化させて、ある程度平坦化を進めてから、照射角度 $\theta$ が30度より小さい状態で、さらに平坦化を進める方法が効率的になる。また同様に試料表面の粗さが比較的大きい場合は照射角度 $\theta$ を90度と0度の間を連続的に変化させることを繰り返すと平坦化が効率的に行えることが理解される。

#### 【0022】

以上の説明および図2のグラフから実施例4における照射角度 $\theta$ を連続的に変化させることは30度以上のいずれかの角度と、30度未満のいずれかの角度との間、好ましくは50度～90度間のいずれかの角度と1度～30度未満間のいずれかの角度との間を連続的に変化させればよいことが理解される。またその連続的に変化される手法も往復させながらである必要はなく、大きい角度から小さい角度に又は小さい角度から大きい角度に連続的に変化させることを繰り返させてもよい。照射角度 $\theta$ を繰り返し連続的に変化させるための機構や、制御の簡単な点では往復動作がやり易い。またその連続的変化の繰り返しの開始角度、終了角度は任意でよいが、繰り返し回数が少ない場合は敢えていえば終了時の角度は小さい方がよいことも理解される。

#### 【0023】

この照射角度 $\theta$ の連続的変化の繰り返し回数は、全体の平坦化処理時間内で1回以上あればよいが、数10回～数100回以上とするのが効果的である。従って照射角度 $\theta$ を変化させる速度も、実施例4で示したように1サイクル1秒に限られるものではない。

次に実施例5における第一段階と第二段階とをどのような割合で行ったらよいかを検討する。実施例5では初期の表面粗さが $R_a$ （平均値）=3.1nmであり、 $R_{max}$ （ピーク値）は約30nm程度である。これを平坦化して $R_a$ =0.41nm、 $R_{max}$ が4nm程度にするが、初期状態の表面は凸凹になっているために、ミクロに見ればいろいろな角度を持った形状をしている。角度的には～30度程度の角度分布を持っていることが予想される。この角度分布が大きいと、この発明により、照射角度 $\theta$ を例えば15度にして照射して平坦化した場合、実際には45度（15度+30度）で照射されている領域があることになり、この領域では効率が悪くなり、つまり、ミクロに見ると平坦化しない領域があることになる。従って第一段階でこの表面のミクロに見た角度分布を15度以下程度にすることにより30度（15度+15度）になるので、平坦化効率が上がると考えられる。実施例5の場合では $R_a$ を半分程度（1.5nm）にすることによって上述の範囲に入るものと考えられる（実際には以下の理由により半分まで必要ないと考えられる）。この $R_a$ を半分程度にするということは、第一段階の照射を初期粗さの半分程度まで行うということにほぼ等しい。

#### 【0024】

この例は産業応用上は典型的なものであるが、実際には様々なケースがあるので、例えば、表面粗さが初期の値の10%以上低減するまで（90%以下になるまで）第一段階の照射を行えばよい。これは表面のミクロに見た凹凸による角度が大きい面は、ガスクラスターイオンビームの照射により平坦化する効率が高い（逆に言うと、粗さが小さいものをさらに小さくする方が時間がかかる）ので、上記の10%程度になるまで平坦化すると、上記の範囲（ミクロに見た角度分布が15度以下程度）に入ることが予想されるからである。

#### 【0025】

第二段階については第一段階と第二段階との全体の処理時間の約10%以上の時間を第二段階に配分するのが効率的である。その理由は以下に基づく実施例5で、処理時間が現

在の装置では10分～30分のオーダーであるが、第一段階処理後、表面粗さは $R_a = 3.1 \text{ nm}$ が $1 \text{ nm}$ 程度になっている。この粗さ $1 \text{ nm}$ を第二段階の処理で $0.4 \text{ nm}$ 程度にするわけであるから、処理時間は $R_a$ の絶対値の差分を平坦化するに必要とする時間以上には必要になり、つまり $3.1 \text{ nm} - 1 \text{ nm} = 2.1 \text{ nm}$ に対して $1 \text{ nm} - 0.4 \text{ nm} = 0.6 \text{ nm}$ であるから、全処理時間の20%以上の時間を第二段階に配分する必要があることになる。前記第一段階と同様に一般的には、上述したように第一段階と第二段階の全処理時間の約10%以上の時間を第二段階に配分するとよい。

#### 【0026】

前述したように、この発明によれば照射角度 $\theta$ を30度未満の一定値とする場合、2段階とする場合、連続的変化の繰り返しなど各種のモードが考えられる。よって、この実施例の平坦化装置では、モード設定と、照射角度 $\theta$ を設定できるようにされてある。例えば図3に示すように、試料支持体18は回転軸21により固定板22a、22b間に回転自在に取り付けられ、モータ23の回転軸の回転が減速歯車24a、24bを介して回転軸21に伝達される。回転軸21と固定板22a間に、試料支持体18の回転角度、つまり試料支持体18に取り付けられた試料19の被平坦化面に対するガスクラスターイオンビームの照射角度 $\theta$ をデジタル値として検出する角度検出部25のエンコーダ板25aが取り付けられる。角度検出部25の電気回路部25bよりの検出角度（照射角度） $\theta_c$ が表示部26の現在角度領域26aに表示される。

#### 【0027】

設定部27中のモード設定部27aを操作して固定モードを設定し、角度設定部27bを操作して目的とする照射角度 $\theta_p$ を入力すると表示部26中のモード領域26bに「固定」が表示され、設定された照射角度が設定角度領域26cに表示され、また制御部28は、駆動部29を通じてモータ23を駆動し、現在角度 $\theta_c$ が設定角度 $\theta_p$ になるように制御する。

2段階モードを設定入力し、照射角度として2回 $\theta_p1$ と $\theta_p2$ を設定入力すると、モード領域に「2段階」が表示され、最初の設定角度 $\theta_p1$ が設定角度領域26cに、2回目の設定角度 $\theta_p2$ が設定角度領域26dにそれぞれ表示され、制御部28により前述の第一段階処理の際に現在角度 $\theta_c$ が設定角度領域26cの角度 $\theta_p1$ になるようにモータ23が駆動制御され、第二段階処理の際には現在角度 $\theta_c$ が、設定角度領域26dの角度 $\theta_p2$ になるようにモータ23が駆動制御される。

#### 【0028】

連続変化モードを設定入力し、角度として2回 $\theta_p1$ と $\theta_p2$ を設定入力すると、モード領域に「連続変化」が表示され、2回の設定角度 $\theta_p1$ と $\theta_p2$ が設定角度領域26cと26dにそれぞれ表示され、制御部28により照射角度 $\theta$ がこれら2つの設定角度 $\theta_p1$ と $\theta_p2$ の間を往復繰り返し、連続的に変化するようにモータ23が制御される。

制御部28は前述した各種表示、モータ23の各種駆動などを、照射角設定プログラムをCPU（中央演算処理器）あるいはマイクロプロセッサにより実行させるものである。設定部27はキーボードなどの入力手段である。このモード・角度設定器は、この平坦化処理の各種条件を設定することができる平坦化処理装置の制御装置に組み込まれる。なおこの発明の平坦化装置は照射角度 $\theta$ を30度未満に固定したもの、つまり照射角度 $\theta$ を変更することができないものでもよい。

#### 【0029】

照射ドーズ量が変化すると、材料のエッチング量が変化し、このエッチング量は照射ドーズ量にほぼ比例する。また照射開始直後は照射ドーズ量の増加とともに表面粗さも減少するが、表面粗さがある程度減少すると、それ以上表面粗さが小さくなることはない。先の各実施例で用いた照射ドーズ量は表面粗さがある程度小さくなつて、これ以上小さくならない領域に近いものである。照射ドーズ量と表面粗さの関係は以上の関係にあるから、照射ドーズ量は小さな値でもよく、その下限値はない。一般的には目的の表面粗さを実現するのに最も小さい照射ドーズ量を用いるのが好ましい。これは通常は平坦化処理の時間が短い方が生産性が高く、被平坦化材料が膜材であることが多く、平坦化に伴う膜減り（

エッティング量) が小さい方が望ましいからである。

【0030】

上記各実施例では加速電圧を 30 kV とした。この加速電圧は高い方がエッティング量が大きくなるが、処理時間が短くなることはわかっている。しかし加速電圧と表面粗さとの関係はいまのところわかっていない。従って加速電圧も平坦化処理に要求される、時間、材料などの各種条件により決定するのがよく、10 kV ~ 45 kV 程度の範囲で選定すればよい。

また、実施例 6、実施例 7 および比較例 3 ~ 比較例 5 を参照すると次のことがわかる。凹凸パターン化された固体表面における凹部または凸部の側壁表面の粗さの値は、エッティング方法やその処理方法によって著しく異なっている。比較例 3 に示した従来のエッティング方法では凹部または凸部の側壁表面の粗さの大きさは大きいことがわかる。比較例 4 や比較例 5 に示したガスクラスターイオンビーム照射を用いても、その照射角度が平坦化したい表面に垂直、すなわち平坦化したい表面(凹部または凸部側壁表面)との照射角度  $\theta_p$  が 90 度の場合には、表面粗さが小さくならないことがわかる。それに比較して、この発明の実施例 6 のように平坦化したい表面との照射角度  $\theta_p$  を 0 度より大きく 30 度より小さくすることによって、凹部または凸部の側壁表面の粗さを著しく小さくすることが可能となる。また、実施例 7 のように凹部または凸部の側壁表面は平面でなくともよく曲面にもこの発明を効果的に適用できることがわかる。このように、この発明は平坦な固体表面に適用するだけでなく、エッティングなどにより形成した凹凸パターン表面における凹部または凸部側壁表面の平坦化にも適用できることや、さらにはいろいろな角度の面や曲面などにも適用できることがわかる。つまり凹部または凸部側壁表面は基板に対して垂直面でなくてもよい。更にこの凹部または凸部側壁表面の平坦化に対しても、実施例 4 の角度  $\theta_p$  を連続的に変化させ、または実施例 5 の角度  $\theta_p$  を変えた 2 段階照射により効率的な平坦化が可能であることも理解されよう。

【0031】

以上の説明から明らかなように、ガスクラスターイオンビームに用いるガス種は、SF<sub>6</sub> や Ar に限らず、どのようなものであってもよく、また、照射条件やクラスターサイズなどの装置条件や実験パラメータも特に限定されるものではなく、どのようなものであってもよい。

【図面の簡単な説明】

【0032】

【図 1】この発明の固体表面の平坦化方法を実現するガスクラスターイオンビーム平坦化装置の基本構成を示す図。

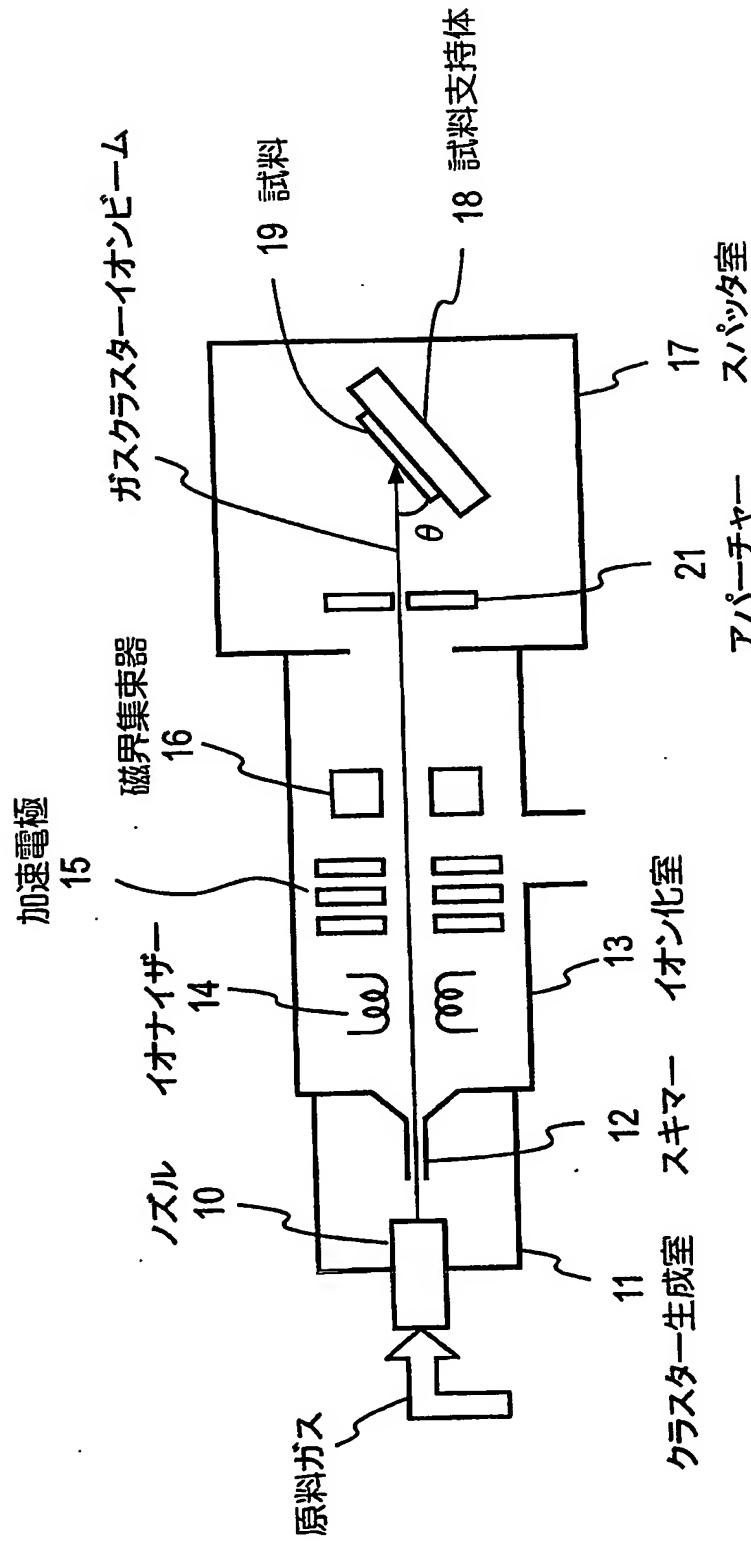
【図 2】照射後の表面粗さ測定結果を示す図。

【図 3】A は照射角度設定機構の一例を示す側面図、B はその正面図と電気的機能構成例を示す図である。

【図 4】凹凸パターンが形成された固体表面の例を示す斜視図である。

【図 5】凹凸パターンが形成された固体表面の他の例を示す斜視図である。

【書類名】 図面  
【図 1】



【図2】

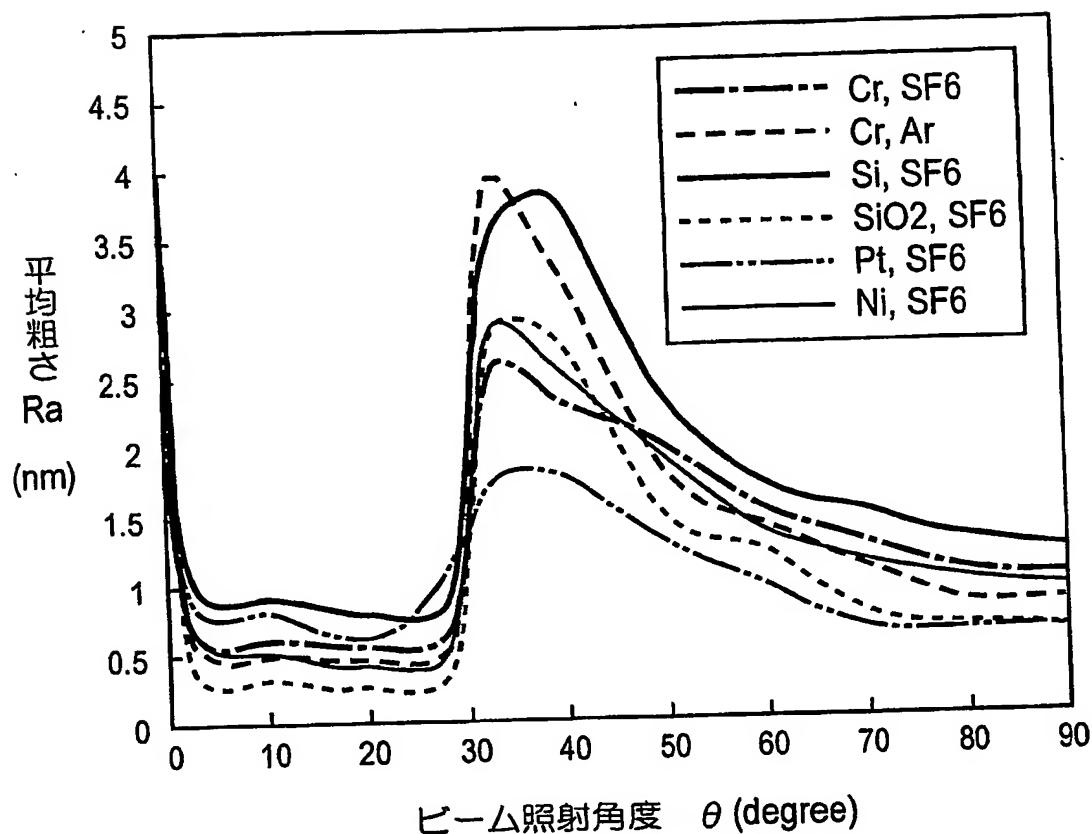
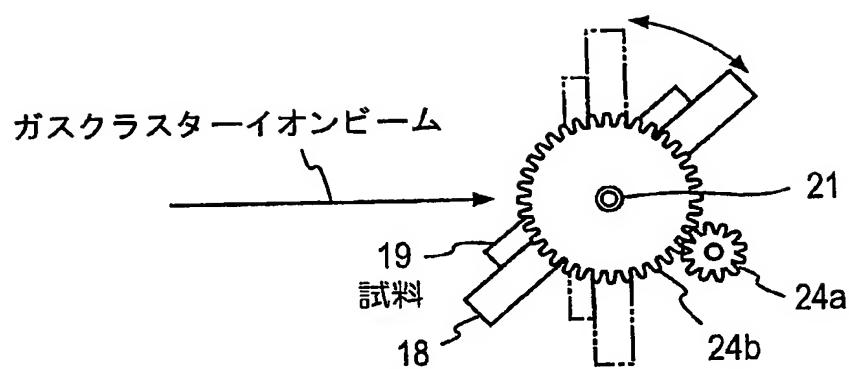


図2

【図3】

A



B

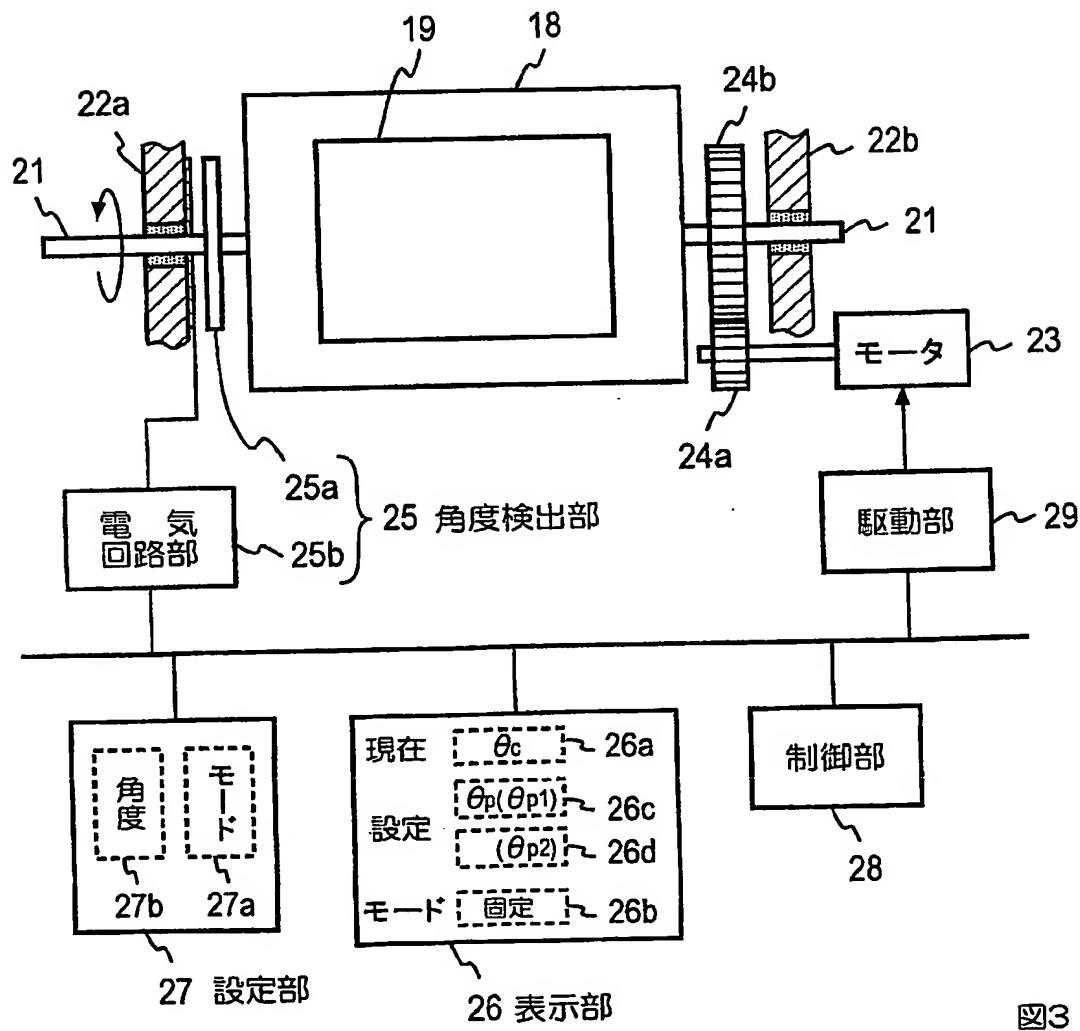


図3

【図4】

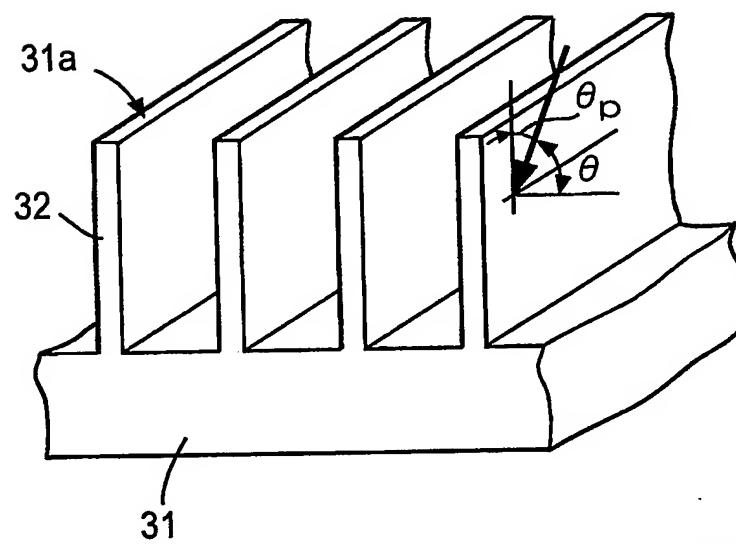


図4

【図5】

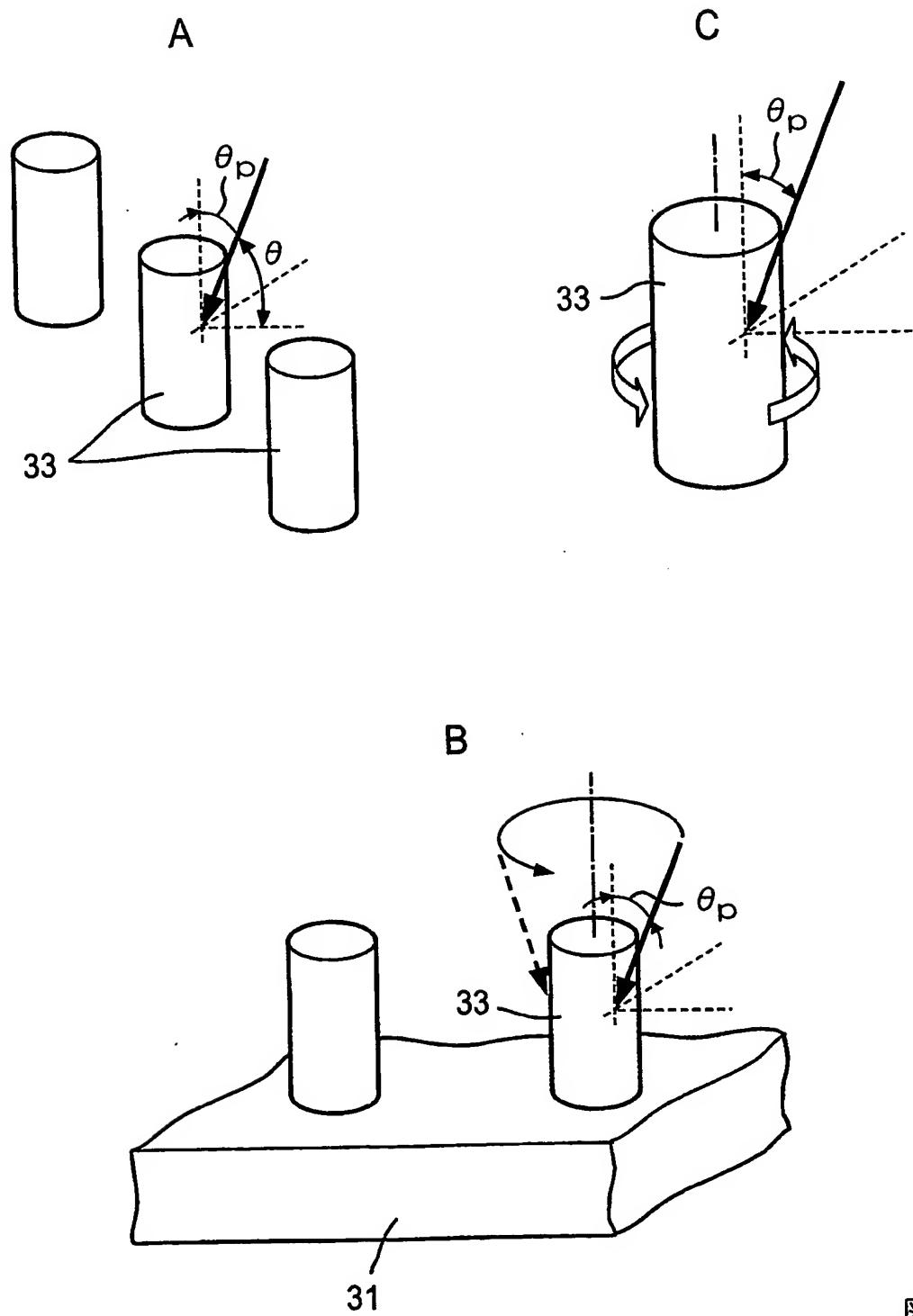


図5

【書類名】要約書

【要約】

【課題】 固体表面の平坦化処理において、低損傷で、かつエッティング量が小さい条件で表面粗さを非常に小さくする。

【解決手段】 固体表面にガスクラスターイオンビームを照射してその固体表面を平坦化する方法において、その固体表面とガスクラスターイオンビームとのなす照射角度  $\theta$  を1度と30度未満との間にする。固体表面が比較的粗い場合は、まず照射角度  $\theta$  を90度程度としてビームを照射し、その後、照射角度  $\theta$  を1度～30度未満として照射して処理効率を上げる。

【選択図】 図2

## 認定・付加情報

特許出願の番号	特願2004-072642
受付番号	50400422336
書類名	特許願
担当官	第五担当上席 0094
作成日	平成16年 3月18日

## &lt;認定情報・付加情報&gt;

## 【特許出願人】

【識別番号】	000231073
【住所又は居所】	東京都渋谷区道玄坂1丁目21番2号
【氏名又は名称】	日本航空電子工業株式会社
【代理人】	申請人
【識別番号】	100066153
【住所又は居所】	東京都新宿区新宿四丁目2番21号 相模ビル
【氏名又は名称】	草野 卓
【選任した代理人】	
【識別番号】	100100642
【住所又は居所】	東京都新宿区新宿4丁目2番21号 相模ビル
【氏名又は名称】	草野特許事務所
	稻垣 稔

特願 2004-072642

出願人履歴情報

識別番号 [000231073]

1. 変更年月日 1995年 7月 5日

[変更理由] 住所変更

住所 東京都渋谷区道玄坂1丁目21番2号

氏名 日本航空電子工業株式会社